



ISSN 1607–2855

Том 5 · № 1–2 · 2004 С. 79–87

УДК 528

Авроральна активність в зв'язку зі структурою геліосферного магнітного поля

В.М. Решетник, М.І. Дзюбенко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Проаналізовано варіації потоку енергії в північну і південну авроральні зони та інтегральну інтенсивність висипань в зв'язку зі змінами конфігурації геліосферного магнітного поля в околі Землі. Показано, що авроральні потоки зростають не лише при південному спрямуванні вектора індукції $B_z < 0$ та при $B_y < 0$, а також при збільшенні повного вектора міжпланетного магнітного поля. Спостерігається також сезонна варіація інтенсивності авроральних вторгнень — загальна авроральна активність максимальна в періоди рівнодень і мінімальна в періоди сонцестоянь. При представленні ММП в геліоцентричній системі координат (HGI) спостерігається глобальна асиметрія авроральних висипань, яка досягає 50% від самого значення індексу активності полярних сьйів. Максимального значення інтенсивності полярних сьйів досягають в середньому, коли вектор ММП лежить в першій чверті системи HGI.

АВРОРАЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ В СВЯЗИ СО СТРУКТУРОЙ ГЕЛИОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, Решетник В.М., Дзюбенко Н.И. — Проанализированы вариации потока энергии в северный и южный авроральные овалы и интегральную интенсивность высыпаний в связи с изменениями конфигурации гелиосферного магнитного поля вблизи Земли. Показано, что авроральные потоки возрастают не только при южном направлении вектора индукции $B_z < 0$ и при $B_y < 0$, а также при увеличении полного вектора межпланетного магнитного поля. Наблюдается также сезонная вариация интенсивности авроральных высыпаний — общая авроральная активность максимальна в периоды равноденствий и минимальна в периоды солнцестояний. При представлении ММП в гелиоцентрической системе координат (HGI) наблюдается глобальная асимметрия авроральных высыпаний, которая достигает 50% от самого значения индекса активности полярных сияний. Максимального значения интенсивности полярные сияния достигают в среднем, когда вектор ММП лежит в первой четверти системы HGI.

AURORAL ACTIVITY IN CONNECTION WITH STRUCTURE OF THE HELIOSPHERIC MAGNETIC FIELD, by Reshetnyk V.M., Dzubenko M.I. — Variations of polar flux in northern and southern ovals and integral precipitation intensity were analyzed in connection with changes of the heliospheric magnetic field near the Earth. It is shown that polar flux increases when the magnetic field has $B_z < 0$ and $B_y < 0$, and when the magnitude of the interplanetary magnetic field increases. The seasonal variation of auroral precipitation intensity is observed also — aurora activity is maximal during equinoxes and minimal during solstices. The dependence of the auroral precipitation on IMF orientation has a strong asymmetry in heliographic inertial coordinates (HGI) which amount to 50 per cent. Auroral intensity is maximum when the magnetic field is situated at the first quadrant of HGI coordinates.

1. ВСТУП

Магнітосфера досить чутлива до зміни параметрів міжпланетного простору. Численні дослідження показали залежність магнітосферної конвекції, струмових систем, магнітних бур, висипання частинок від міжпланетного магнітного поля (ММП). Полярні сьйива є одним з характерних проявів активності земної магнітосфери, відслідковують її зміни. Варіації полярних сьйів при змінах орієнтації ММП були помічені досить давно [1, 6]. Ці дослідження показали залежність появи авроральних дуг від B_z компоненти ММП. Разом з тим, за допомогою ультрафіолетових зображень полярної зони, отриманих з космосу, було встановлено, що розташування дуг є чутливим також до знаку B_y ММП [3–5, 9]. Наземні спостереження теж підтвердили чутливість полярних сьйів до зміни знаку B_y [10, 12]. Була знайдена залежність поведінки всього аврорального овалу від орієнтації

міжпланетного поля [2, 3]. Деякі дослідники помітили залежність авроральних явищ від B_x компоненти ММП [3, 16]. Встановлені також сезонні варіації полярних сьйв [8, 15]. Було показано, що влітку вечірній сектор аврорального овалу сильніше відчуває вплив B_y -компоненти міжпланетного магнітного поля. Разом з тим положення вранішнього сектора овалу не залежить від знаку B_y і сезону.

Однак, переважно вивчалась залежність полярних сьйв від міжпланетного поля без врахування сезону року, або лише як функція B_z -компоненти міжпланетного поля. Слід відзначити також, що більшість робіт стосуються разових подій або окремого конкретного явища в авроральному овалі [2, 14]. Тому більш детальне дослідження поведінки аврорального овалу залежно від азимутальної орієнтації ММП на великому спостережному матеріалі залишається актуальним.

2. ДАНІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ І ОБРОБКА

У роботі використана інформація про стан міжпланетного поля поблизу Землі, наведена в базі даних OMNI (web-адреса <http://dbserv.npi.msu.su/data/release2/omnionline.html>) з 1978 по 2001 роки. Компоненти ММП обчислювались зі спостережень КА IMP8 та ISEE3 і представлені в системі GSM та HGI. В системі GSM: вісь X спрямована вздовж лінії Земля Сонце, вісь Z лежить в площині осі X та осі магнітного диполя Землі, вісь Y утворює праву трійку координатних векторів і лежить в площині близькій до площини екліптики. Геліографічна інерційна система координат (HGI) має наступні характеристики: вісь X є лінією перетину площини екліптики та сонячного екватору, вісь Z перпендикулярна площині екватора Сонця і направлена на північ, вісь Y утворює праву трійку координатних векторів і лежить в площині сонячного екватора. Використовувались щогодинні дані стану сонячного вітру. Інтервал біля години відповідає характерному часу реакції магнітосфери на зміни сонячного вітру на орбіті Землі; це так званий час затримки [8, 11, 13].

Деякий параметр p , поведінка якого в залежності від ММП нас цікавить, ставився у відповідність азимутальному куту повороту вектора ММП ϕ на момент спостереження. Далі усереднювались наявні значення p для кожного 10-градусного сектора, на які розбивався повний набір напрямів ϕ . Результат представлявся на полярній діаграмі $\langle p \rangle(\phi)$. Азимутальний кут ϕ відраховується від осі X проти годинникової стрілки в площині XY (вид з півночі). Шкала величин вказана біля кожного графіка зліва. Нуль-пункт амплітуди параметра p зміщений, для рельєфнішого виділення варіацій вибраного параметру. Довірчий інтервал, вказаний на графіках, складає $\pm\sigma$.

За характеристику авроральних явищ було вибрано два різних параметри: енергопотік та інтегральна яскравість овалу. Добре відомо, що активність полярних сьйв пов'язана з енергетичним потоком в межах аврорального овалу (PF), що привноситься частинками, які висипаються. Цей потік пропорційний оптичній яскравості овалу на ультрафіолетових зображеннях і визначається на основі спостережень полярних супутників NOAA (web-адреса <http://sec.noaa.gov/ftplib/lists/hpi/>) і приведений в гігаватах. Наявні дані для північного та південного овалів надають унікальну можливість порівняння процесів в різних півкулях. Спостереження подаються з інтервалом в одну-дві години, в залежності від моменту проходження супутника над овалом. Використовувались результати вимірювань за період з 1978 по 2001 рік, випали з цього ряду лише 1989 та 1990 роки за відсутністю спостережень. Інший параметр активності полярних сьйв встановлювався за зображеннями аврорального овалу, отриманими з бази даних OVATION (web-адреса: <http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation/>). Зображення овалу будуються на базі спостережень супутників серії DMSP при прольоті ними полярних регіонів. Супутники серії DMSP є низьковисотними метеорологічними супутниками з коловими сонячно-синхронними орбітами. Нахил орбіти складає 98.7° . Використані дані з 1983 по 1999 роки, всього більше 60000 зображень північного аврорального овалу. Надалі, кожне зображення було проінтегроване згідно з вказаною шкалою інтенсивностей, і отримана величина приймалась як характеристика аврорального овалу (індекс). Наявність зображення всього овалу дало можливість проводити дослідження його секторів, в зв'язку з напрямком міжпланетного магнітного поля, вивчати сезонні та добові зміни в овалі.

Відомості про міжпланетне магнітне поле подаються на початок кожної години, тоді як спостереження потоку енергії — на момент проходження супутника. Тому для співставлення двох рядів спостережень використовувалась лінійна інтерполяція авроральних даних на момент початку кожної години за умови, що найближчий вимір полярного енергопотіку відстоїть у часі не більше, ніж на півгодини. Таким чином були отримані четвірки даних на певний момент часу: три компоненти ММП та інтерпольований полярний енергопотік. Загальна кількість таких реєстрів налічує біля 65 тисяч для кожної півкулі. Далі для кожного реєстру визначалось: $\phi = \arctg(B_y/B_x)$. Здійснювалась також сепарація даних в залежності від напрямку B_z та величини напруженості тощо.

Подібний аналіз проведено також для інтегральних інтенсивностей аврорального овалу чи його секторів. Були отримані четвірки даних, з компонентами міжпланетного магнітного поля та значенням інтенсивності овалу. Загалом, кількість реєстрів склала біля 20000 для північної півкулі за період з 1983 по 1999 роки. Фактично аналіз інтегральної інтенсивності аврорального овалу був проведений як альтернативний до аналізу енергопотіку, але разом з тим надавав можливість вивчення поведінки частин овалу. Результати як для енергопотіку, так і для інтенсивності овалу були представлені на полярних діаграмах в двох різних системах: GSM та HGI.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Вказаними вище методами ми отримали залежність між напрямком ММП і характеристиками активності аврорального овалу.

Рис. 1а містить усереднені значення потоку для північної полярної шапки, рис. 1б для південної. Добре помітна азимутальна асиметрія наведених графіків.

Відомо, що південне спрямування ММП значно посилює активність овалу, на що вказували багато дослідників. Подібна закономірність також була отримана на нашому матеріалі.

Далі ми провели аналіз для трьох різних діапазонів індукції МП: слабкого поля, $B < 5$ нТс, середнього з $B = 5 - 8$ нТс і сильного, $B > 8$ нТс. Таке розділення спостережень дало три приблизно однакових масиви для подальшої обробки. Для слабкого ММП отриманий авроральний енергопотік наведено на рис. 2а і рис. 2б окремо для північної та південної півкуль. Помітно, що активність авроральних явищ є мінімальною для другого квадранту, а максимальною при сильних збуреннях середньої спіральної структури, коли відповідає першому та третьому квадрантам.

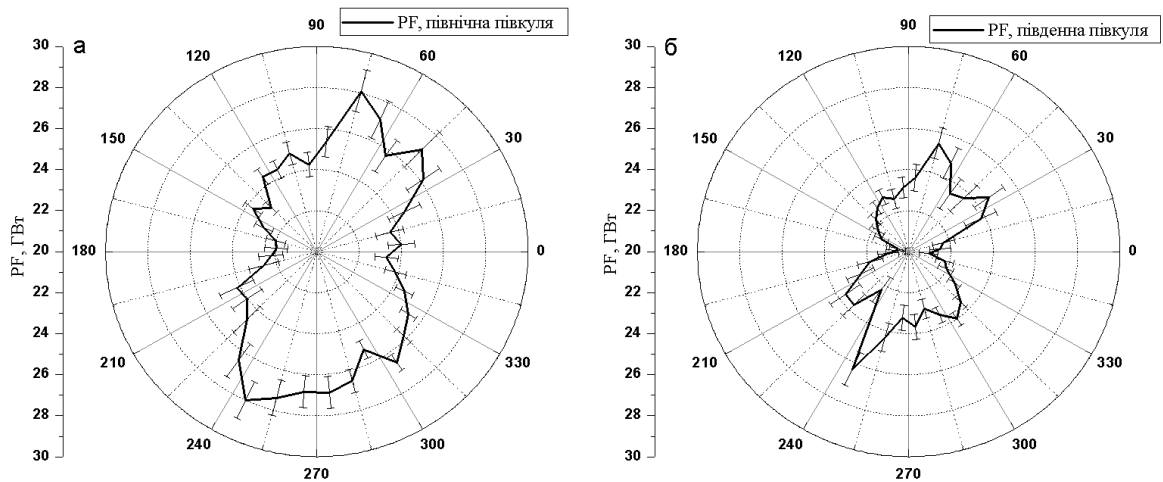


Рис. 1. Енергопотік в північний (а) та південний (б) овали як функція азимутального напрямку ММП

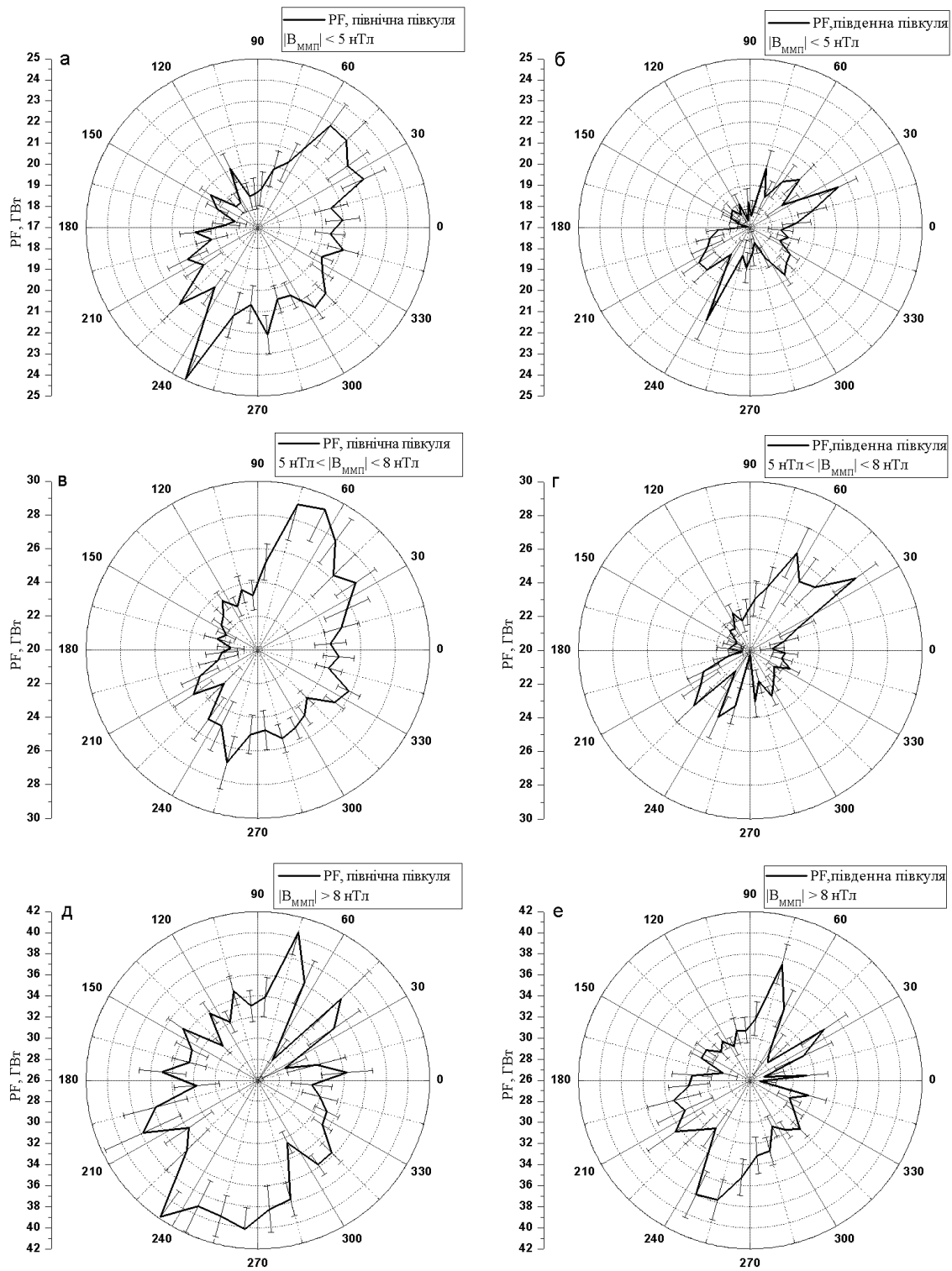


Рис. 2. Енергопотік в північний(а) та південний (б) овали для малої індукції ММП ($B < 5 \text{ нТс}$), північний (в) та південний (г) овали для середньої індукції ММП ($5 \text{ нТс} < B < 8 \text{ нТс}$), північний (д) та південний (е) овали для індукції ММП $B > 8 \text{ нТс}$.

Якщо порівнювати ситуації для магнітних полів, близьких до середніх спіральних, то коли $B_y > 0$ (другий квадрант, $\phi \sim 135$), авроральний енергопотік є меншим, ніж коли $B_y < 0$ (четвертий квадрант, $\phi \sim 315$). Подібний висновок був також отриманий Shue et al. [15] для північної півкулі шляхом аналізу яскравості аврорального овалу в ультрафіолетовому діапазоні.

Слід також відмітити, що форма поведінки енергопотіку для різних напрямків ММП є подібною в обох півкулях. Аналогічні результати були отримані для середнього значення індукції міжпланетного поля і наведені на рис. 2в та рис. 2г, але в цьому випадку загальний енергопотік є вищим. Для сильного ММП авроральний енергопотік є значно вищим, ніж для помірних полів. При цьому асиметрія, що пов'язана з напрямком вектора магнітного поля, менш помітна (рис. 2д,е). Отже при сильних геліосферних міжпланетних полях потік в авроральний овал більший, і менше залежить від азимутального напрямку ММП. Південне спрямування вектора ММП також збільшує енергопотік і дещо нівелює асиметрію, яка спостерігається для $B_z > 0$.

Активність авроральних явищ залежить від пори року. Так Liou et al. [7] показали, що нічні дискретні полярні саява частіше з'являються весною, ніж восени, а яскравість саяв на денній стороні овалу є вищою влітку у порівнянні з весною. Для подальшого аналізу ми розбили весь масив спостережних даних на чотири підмасиви (за сезонами), по три місяці кожний, з центровою на дні весняного та осіннього рівнодень і літнього та зимового сонцестоянь.

На рис. 3а приведений загальний енергопотік в північній авроральний овал для зимового та літнього сонцестоянь. Для літа спостерігається явна асиметрія, інтенсивність авроральних явищ мінімальна в другому квадранті діаграми ($B_y > 0$), а максимальна для четвертого квадранту, коли $B_y < 0$. Для зими асиметрія є протилежною до літньої, а саме в четвертому квадранті, коли $B_y < 0$, авроральна активність є мінімальною. На рис. 3б наведені аналогічні діаграми для весняного та осіннього рівнодень. Для осені активність є вищою коли ММП спрямоване від Сонця, тобто коли $B_y > 0$, тоді як весною активність більша при $B_y < 0$. Для авроральних явищ південної півкулі також спостерігається асиметрія. Але слід зауважити, що сезонна асиметрія є для південної півкулі меншою ніж в північній півкулі (рис. 4).

Вектор дипольного моменту Землі влітку спрямований від Сонця, і тому через'єднання антипаралельних магнітних ліній більш інтенсивне в високих широтах північної півкулі. Тобто влітку магнітосфера більш чутливо реагує на стан ММП [15], і ступінь асиметрії є вищою ніж взимку.

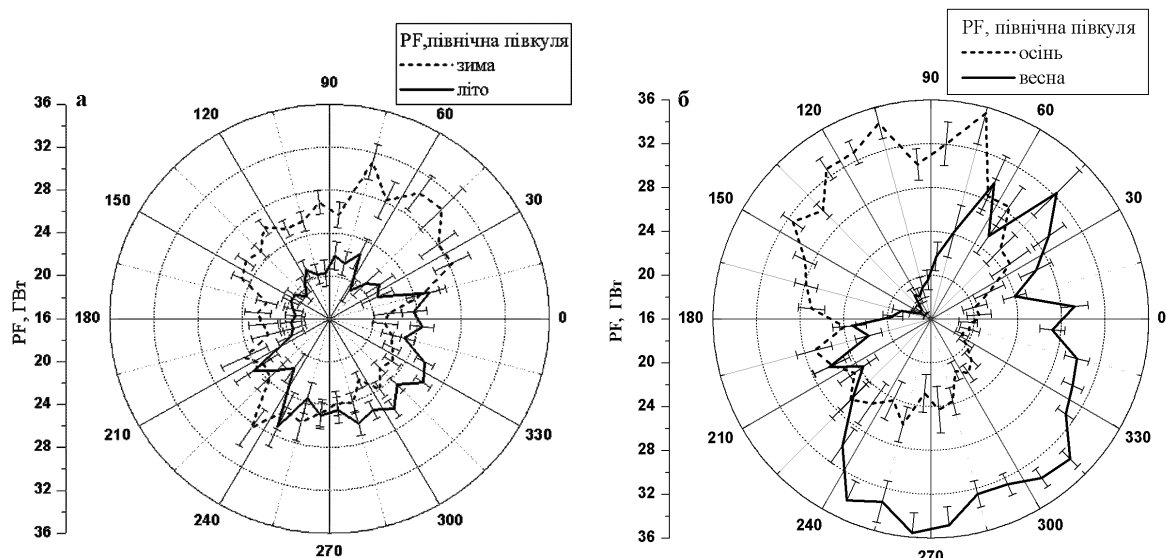


Рис. 3. Енергопотік в північний (а) та південний (б) овал для зимового (пунктирна лінія) та літнього (суцільна лінія) сонцестоянь в залежності від азимутального напрямку ММП

Зимом інтенсивне перез'єднання відбувається в південній півкулі, оскільки вектор магнітного моменту Землі спрямований до Сонця. Рис. 4 демонструє поведінку енергопотіку в південній півкулі за зимовий та літній періоди. Видно, що взимку південний авроральний овал є більш чутливим до напрямку ММП, ніж влітку, тобто поведінка протилежна північному овалу. Це підтверджує висловлене вище припущення.

Також була досліджена поведінка енергопотіку як функції напрямку вектору ММП в геліоцентричній системі НГІ. В такій системі ми позбавлені впливу сезонного положення Землі відносно Сонця. На рис. 5 наведено енергопотік в північну (5а) та південну (5б) півсферу в залежності від азимутального кута напрямку вектору індукції міжпланетного поля.

Помітна досить велика асиметрія авроральних висипань як для північної, так і південної пів-

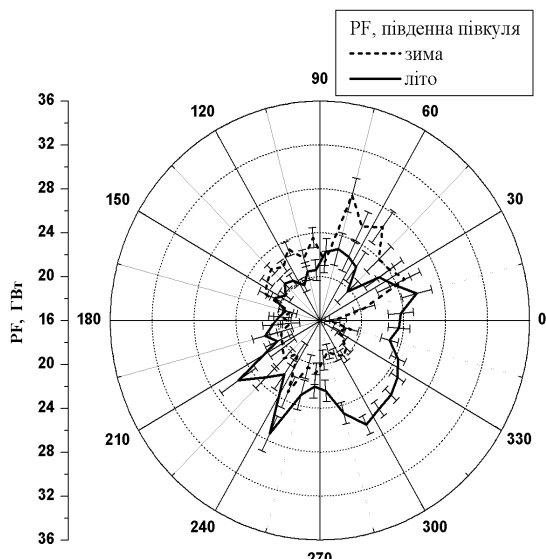


Рис. 4. Енергопотік в південний овал для зимового (пунктирна лінія) та літнього (суцільна лінія) сонцестоянь в залежності від азимутального напрямку ММП

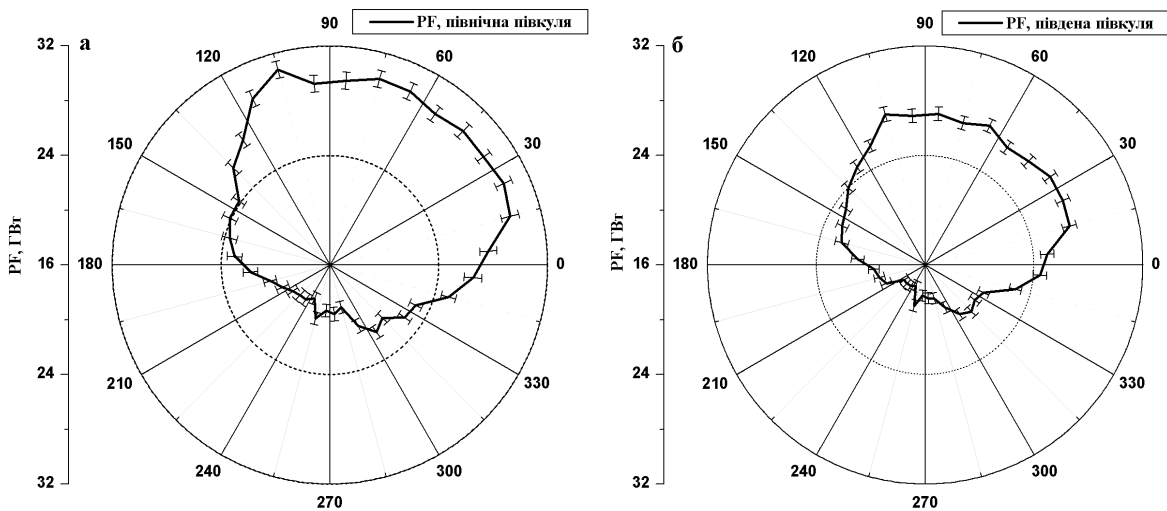


Рис. 5. Енергопотік в північний (а) та південний (б) овал в залежності від азимутального напрямку ММП в геліоцентричній системі

куль. Різниця між найменшими значеннями та найбільшими складає більше 50% від самого індексу активності. Коли вектор ММП лежить в першому квадранті, то активність полярних сьйв в середньому максимальна, тоді як для третього квадранту маємо мінімум. Таким чином, сезони асиметрії висипань полярних сьйв, які добре помітні в системі GSM, можна пояснити глобальною асиметрією в геліоцентричній системі відліку. Зміна форми графіку залежності активності полярних сьйв в залежності від напрямку вектору ММП фактично пов'язана з річним рухом Землі навколо Сонця. Але спостережувана глобальна асиметрія потребує свого більш детального вивчення. Можна допустити, що тут ми маємо справу з глобальним впливом на геліосферу, який врешті-решт відбивається на активності овалу.

Була також проаналізована поведінка різних секторів аврорального овалу. Овал був розбитий на чотири частини: вечірній, ранішній, полуденний та нічний сектори. Кожен сектор займає 6 годин по місцевому магнітному часу. Результати наведені в геліоцентричній системі координат (рис. 6).

На рис. 6 наведені результати для поведінки секторів аврорального овалу в системі HGI. Добре помітно для всіх секторів овалу, що є певний виділений напрямок міжпланетного магнітного поля,

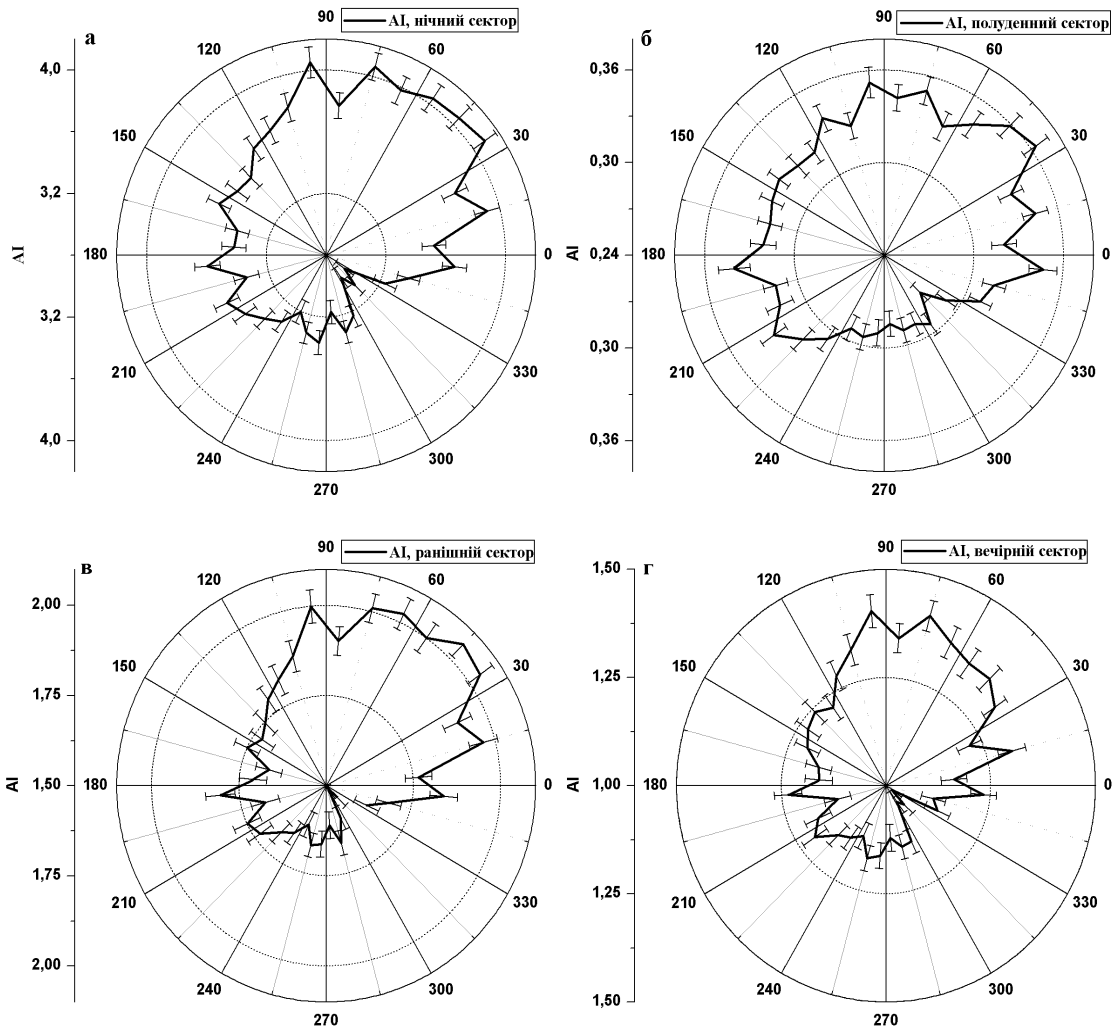


Рис. 6. Інтенсивність вечірнього (а), ранішнього (б), нічного (в) та денного (г) секторів північного аврорального овалу в залежності від азимутального напрямку ММП в системі HGI

коли активність полярних сьайв є вищою, а саме коли вектор ММП лежить в першому квадранті. Загалом форма графіку залежності інтенсивностей різних секторів від азимутального напрямку вектору міжпланетного поля подібна до залежності всього овалу. Головний вклад в інтенсивність овалу дають нічний (рис. 6а) та вранішній (рис. 6в) сектори.

4. ВИСНОВКИ

1. Проведено статистичне дослідження варіацій аврорального енергопотіку в залежності від напрямку ММП. Встановлено, що середня авроральна активність для обох півкуль є вищою, коли $B_y < 0$.

2. Потік енергії в авроральну область залежить також від величини напруженості міжпланетного поля; з її зростанням активність авроральних явищ помітно збільшується. Південне спрямування ММП також значно підсилює енергопотік.

3. Активність авроральних явищ залежить не лише від напрямку та величини ММП, але і від пори року. Загальна активність є мінімальною в періоди сонцестоянь і максимальна в періоди рівнодень. Для північної півкулі авроральна активність досягає мінімуму в період літнього сонцестояння, тоді як для південної півкулі — в період зимового.

4. При представленні ММП в геліоцентричній системі координат спостерігається глобальна асиметрія авроральних висипань, яка досягає 50% від самого значення індексу активності полярних сьайв. Максимального значення інтенсивності полярні сьайва досягають в середньому, коли вектор ММП лежить в першій чверті системи HGI. Південне спрямування міжпланетного магнітного поля збільшує активність авроральних явищ.

5. Проведено аналіз різних секторів аврорального овалу. В геліоцентричній системі координат усі сектори овалу ведуть себе однаково чиним в залежності від напрямку вектору індукції ММП, і досягають максимальної інтенсивності при розташуванні азимутальної компоненти вектору ММП в першому квадранті.

1. *Carlson H.C.* Dynamics of the quiet polar cap // *J. Geomagn. Geoelectricity*. — 1990. — **42**. — P. 697–708.
2. *Cumnock J.A., Sharber J.R., Heelis R.A., Hairston M.R., Craven J.D.* Evolution of the global aurora during positive IMF Bz and varying IMF By conditions. // *J. Geophys. Res.* — 1997. — **102**, № A8. — P. 17489–17497.
3. *Elphinstone R.D., Jankowska K., Murphree J.S., Cogger L.L.* The configuration of the auroral distribution of interplanetary magnetic field northward IMF and dependence as observed by the Viking satellite // *J. Geophys. Res.* — 1990. — **95**, № 5. — P. 5791–5804.
4. *Gussenhoven M.* Extremely high latitude auroras // *J. Geophys. Res.* — 1982. — **87**, № 4. — P. 2401–2412.
5. *Kullen A., Brittnacher M., Cumnock J.A., Blomberg L.G.* Solar wind dependence of the occurrence and motion of polar auroral arcs: A statistical study // *J. Geophys. Res.* — 2002. — **107**, № A11.
6. *Lassen K., Danielsen C.* Quiet time pattern of auroral arcs for different directions of the interplanetary magnetic field in the Y–Z plane // *J. Geophys. Res.* — 1978. — **83**, № 11. — P. 5277–5284.
7. *Liou K., Newell P.T., Meng C.-I., Brittnacher M., Parks G.* Synoptic auroral distribution: A survey using Polar ultraviolet imagery // *J. Geophys. Res.* — 1997. — **102**, № A12. — P. 27197–27205.
8. *Liou K., Newell P.T., Meng C.-I., Brittnacher M., Parks G.* Characteristics of the solar wind controlled auroral emissions // *J. Geophys. Res.* — 1998. — **103**, № 8. — P. 17543–17558.
9. *Makita K., Meng C.-I., Akasofu S.-I.* Transpolar aurora their particle precipitation and IMF By component // *J. Geophys. Res.* — 1991. — **96**, № 8. — P. 14085–14095.
10. *McWilliams K.A., Milan S.E., Yeoman T.K., Sigwarth J.B., Frank L.A., Brittnacher M.* Interplanetary magnetic field By dependence of the relative position of the dayside ultraviolet auroral oval and the HF radar cusp // *J. Geophys. Res.* — 2001. — **106**, № A12. — P. 29027–29036.
11. *Meng C.-I., Tsurutani B., Kawasaki K., Akasofu S.-I.* Cross-correlation analysis of the AE-index and the interplanetary magnetic field Bz-component // *J. Geophys. Res.* — 1973. — **78**, № 4. — P. 617–629.

12. Moen J., Carlson H.C., Sandholt P.E. Continuous observation of cusp auroral dynamics in response to an IMF By polarity change // Geophys. Res. Lett. — 1999. — **26**, №9. — P. 1243–1246.
13. Rodriguez J.V., Valladares C.E., Fukui K., Gallagher H.A. Antisunward decay of polar cap arcs // J. Geophys. Res. — 1997. — **102**, №A12. — P. 27227–27247.
14. Sandholt P.E., Farrugia C.J. On the dynamic cusp aurora and IMF By // J. Geophys. Res. — 1999. — **104**, №A6. — P. 12461–12472.
15. Shue J.-H., Newell P.T., Liou K., Meng C.-I. Influence of interplanetary magnetic field on global auroral patterns // J. Geophys. Res. — 2001. — **106**, №A4. — P. 5913–5926.
16. Shue J.-H., Newell P.T., Liou K., Meng C.-I., Cowley S.W.H. Interplanetary magnetic field Bx asymmetry effect on auroral brightness // J. Geophys. Res. — 2002. — **107**, №A8. — P. 1197–1208.

Надійшла до редакції 8.11.2004